

# 토지이용-교통 통합모델의 이론적 토대와 운용 메카니즘에 관한 소고:

이희연\* · 김동완\*\*

## <目 次>

- |                            |                        |
|----------------------------|------------------------|
| I. 서론                      | 1. 토지이용-교통 통합모델의 전체 구조 |
| II. 토지이용-교통 통합모델의 이론적 토대   | 2. 토지이용모델의 작동구조        |
| 1. 공간미시경제모델                | 3. 교통모델의 작동구조          |
| 2. 공간적 상호작용모델              | 4. 토지이용-교통모델 통합화 작동구조  |
| 3. 공간선택모델                  | IV. 결론                 |
| III. 토지이용-교통 통합모델의 운용 메카니즘 |                        |

## I. 서론

최근에 들어와 급증하는 에너지 소비와 그에 따른 환경오염이 매우 심각한 수준에 이르면서, 보다 지속가능한 도시발전을 위해 저에너지 소비형의 도시공간구조를 지향해야 한다는 주장이 많은 사람들의 공감대를 얻고 있다. 자원절약형 저에너지 소비형 도시를 만들어 가는데 가장 큰 영향을 미치는 분야는 토지이용과 교통이라고 볼 수 있는데, 이는 토지이용의 변화는 교통수요와 통행발생을 유발하고 에너지 소비 증가로 이어지기 때문이다(Badeo & Miller, 2000; Handy, 2005). 특히 교통 분야는 도시 전체 에너지 소비의 약 31%를 차지하고 있으며, 대기오염의 약 80%를 주도하고 있다. 우리나라의 경우 2006년 말 세대 당 자동차 보유대수가 0.87대로 증가하여 개인 승용차에 의한 에너지 소비와 교통문제가 매우 심각한 수준이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 전략으로 세제 및 유가정책 등 단기적인 방법보다는 토지이용 정책을 통한 대중교통 활성화 전략 등 중장기적이며 근본적인 대책들이 다각적으로 강구되고 있다.

저에너지 소비형 도시구조로 지향해 나가는데 가장 직접적으로 영향을 주는 교통문제를 해결하기 위해 통행발생을 유도하며, 개인의 통행수단 선택에 지대한 영향을 미치는 토지이용 패턴을 분석하는 연구들이 수행되었다(Boarnet & Crane, 2001; Cervero, 1996; Crane, 2000; Zegras,

\* 서울대학교 環境大學院 교수

\*\* 서울대학교 環境大學院 박사과정

2004). 최근 교통부문의 에너지 소비를 줄이기 위한 다각적인 기술개발만으로는 한계가 있기 때문에 미국, 영국, 호주, 일본 등에서는 토지이용계획에 기반을 둔 장기적·거시적 공간계획을 수립하려는 노력들이 상당히 이루어지고 있으며, 더 나아가 토지이용, 교통, 환경을 통합한 정책을 시행하려는 구체적인 제도도 마련되고 있다.

토지이용은 공간구조와 교통체계를 결정하는 중요한 요소로, 특히 인구밀도, 도시규모, 도시형태와 혼합토지이용 패턴 등은 교통수요와 공급을 결정하고, 이는 바로 교통에너지 소비에 직·간접적인 영향을 미치게 된다. 이러한 맥락에서 계획가들이 압축도시(compact city)에 대해 긍정적 관점을 보인다고 볼 수 있다. 압축형 도시로 개발되는 경우 도시의 외연적 확산을 지양하고 주거, 직장, 상업, 서비스 등 일상적인 도시기능들을 가급적 기성시까지 내부로 수용하여 상대적으로 밀집된 개발과 혼합토지이용을 유도하여, 에너지 효율성이 높은 대중교통 분담율을 높이고 과도한 이동을 줄여 에너지 절약과 대기오염을 감소할 수 있다는 장점 때문이다.

토지이용정책과 교통정책을 통합함으로써 교통에너지 소비를 감소시키는 자원절약적 도시공간 구조의 기틀을 조성하는 것이 지속가능한 도시발전을 마련해나가는 것이라고 볼 수 있다. 따라서 효율적인 교통계획을 수립하기 위해서는 단편적인 교통시설 투자계획이나 교통정책 개선보다는 토지이용체계, 더 나아가 도시활동체계 전반을 종합적으로 분석하여야 한다.

지금까지 우리나라에서 도시공간구조나 도시형태 패턴에 따른 에너지 효율성과 환경의 질을 평가하고 비교, 분석한 연구들은 상당히 이루어졌으나, 토지이용-교통모델을 통합한 접근방법은 아직 도입되지 못하고 있다. 토지이용모델과 교통모델과의 통합적 접근방법의 장점은 잘 알려져 있으며, 통합적 접근방법의 필요성에 대해서도 많이 거론되었지만, 실제로 통합적으로 수행할 수 있는 작동가능한 소프트웨어의 활용과 데이터베이스 구축이 어렵기 때문에 실증적으로 활용되지 못하고 있다. 교통계획가들의 경우 교통 수요는 외생적으로 주어지는 것으로 받아들여 교통의 4단계 모델을 운영해왔으며, 따라서 중장기 교통수요를 예측하여 그 수요에 대응하는 공급능력체계를 수립하는 것이 상당히 어려웠다. 반면에 토지이용 계획가들의 경우 다양한 경제활동의 입지가 토지이용의 변화 및 통행수요에 상당히 영향을 주는 동시에 교통부문의 투자에 따라서 토지이용이 영향을 받고 있음에도 불구하고, 실제로 토지이용 계획 수립시에 교통체계와의 상호작용을 파악하는데 미흡하였다.

본 연구의 목적은 에너지 절약적인 도시공간구조와 이를 기반으로 하는 지속가능한 도시개발을 하는데 필요한 도시시뮬레이션 모델의 초석으로서 토지이용-교통 통합모델의 이론적 토대와 통합 모델의 운용 메커니즘을 고찰하려는 것이다. 세부목적으로는 첫째, 토지이용-교통의 통합 모델이 기초하고 있는 이론들이 어떻게 연계고리를 가지고 발달되어왔는가를 고찰하려고 한다. 둘째, 토지이용-교통 통합모델의 구조와 알고리즘 및 운용 메커니즘을 파악하려고 한다. 이러한 고찰을 통해 토지이용-교통과의 상호의존적 영향력을 분석하는데 도움을 줄 수 있으며, 토지이용-교통 모델의 통합적 접근방법을 통해 에너지 효율적인 도시공간구조를 구축하고 지속가능한

도시개발을 도모하는 정책 수립에 필요한 도시성장모델의 활용성을 높일 수 있을 것이다.

## II. 토지이용-교통 통합모델의 이론적 토대<sup>1)</sup>

토지이용-교통 통합모델은 도시체계의 미래 패턴을 예측하거나, 토지이용 정책이나 교통정책 또는 계획의 영향력을 평가하기 위한 모의실험(simulation) 모델이라고 볼 수 있다(Harris, 1985) 토지이용-교통 통합모델은 도시개발이나 계획 및 정책들이 지속가능한 도시개발에 미치는 영향을 사전에 시뮬레이션하여 결과를 산출할 수 있기 때문에, 중장기 계획의 효과나 영향력을 사전에 검증해보는 실험실과 같은 역할을 한다고 볼 수 있다.

토지이용-교통 통합모델의 이론적 토대는 1960년대 들어오면서 본격적으로 이루어졌다고 볼 수 있다. 인간의 활동, 특히 경제활동들이 공간상에 입지할 때 필요한 여러 요인들을 검토하여 그 입지를 확률적으로 배분하고, 그에 따라 파생되는 통행수요와 통행발생 및 통행 배정에 이르기까지 시뮬레이션할 수 있는 모델을 구축하기 위한 노력들이 지속적으로 이루어졌다. 토지이용 모델과 교통 모델을 통합화하여 도시의 동태적 특성을 예측하고자 하는 목적으로 개발된 최초의 대표적인 모델은 주거·고용 예측 모델인 ITLUP(Integrated Transportation and Land Use Package)이다. Putman(1983)에 의하여 개발된 이 모델은 DRAM(Disaggregated Residential Allocation Model)과 EMPAL(Employment Allocation Model)이라는 두개의 하위모델로 구성되어있다. 이 모델을 GIS와 연계시켜 계획지원시스템으로 개발된 시스템이 METROPOLIUS이다.

1990년대에 들어오면서 토지이용-교통 통합모델들은 계획지원시스템(PSS: Planning Support System)이란 이름으로 개발되기 시작하였다. 이는 ‘계획’ 자체가 본질적으로 최적화되기 어려우며, 따라서 계획지원시스템을 활용함으로써 여러 시나리오를 통해 산출된 대안들을 비용과 편익에 비추어 최적의 대안을 선택할 가능성을 높이려는 노력의 일환으로 개발되었다고 볼 수 있다. 뿐만 아니라 지속가능한 개발을 지원하기 위해 개발된 계획지원시스템은 토지이용과 교통, 환경 부문을 연계하여 시뮬레이션하도록 모델화되어 있으며, 정책의 사회, 경제, 환경적 효과를 평가할 수 있는 기능도 갖고 있다(Brail & Klosterman, 2001). 계획지원시스템으로 개발되어 활용되어 온 모델들 가운데 실증적 활용성 및 인용빈도가 높으며 현 시점에서 인터넷 상에서 자유롭게 사용자들이 다운받을 수 있어 우리나라에서 활용 가능성이 큰 계획지원시스템으로는 TRANUS와 UrbanSim이 있다. 이 두 모델 모두 토지이용-교통 통합모델이며, 특히 Urbansim은 토지이용-교통-환경의 부문을 통합한 모델이다.

본 연구에서는 토지이용-교통 통합모델의 이론적 토대를 고찰하는데 있어서 어떠한 이론들이 연계고리를 가지고 발달되어 왔는가를 살펴보는 데 초점을 두고자 한다. 특히 토지이용-교통 통

1) 토지이용-교통의 통합모델의 이론적 토대는 Tomas de la Barra(1989), *Integrated Land Use and Transport Modelling: Decision Chains and Hierarchies*를 참조하여 고찰하였음.

합모델의 핵심을 이루는 공간미시경제모델(spatial micro economics model), 공간적 상호작용이론(spatial interaction model), 공간선택모델(spatial choice model)에 대해 고찰하고자 한다. 공간미시경제모델은 개별적(disaggregated) 접근방식으로, 개개인 행위자의 수요함수를 구성하고 이를 취합하여 전체 시장에서의 수요를 산출하고 주어진 토지공급과의 균형을 전제로 하는 모델이다. 이에 반해 공간적 상호작용이론은 집단적(aggregated) 접근방식으로, 공간과 활동 모두 이산(離散)범주에 속하는 속성을 가지고 있다고 보고, 구체적인 개체로 분석하는 대신에 구역(zone) 단위로 묶어 집단화시키고 있다. 또한 경제, 사회적 계층에 따라서 그룹화하고 그룹내의 개개인들은 유사한 특성을 가진다고 가정한다. 따라서 공간미시모델과 공간적 상호작용 모델은 양 극단적인 관점을 지니고 있다고 볼 수 있다. 이러한 두 극단사이에서 절충적 관점을 지닌 것이 공간선택모델이라고 볼 수 있는데, 이산선택모델(discrete choice model)은 개개인 선택의 합리성은 인정하되 그것을 집단화하는 과정에서 무작위확률효용이론(random utility theory)을 적용하고 있다.

### 1. 공간미시경제모델

인간의 활동들이 공간상에 어떻게 분포되는가를 설명하기 위한 초기 모델은 공간미시경제이론에 기초한다. 미시경제모델은 1826년 Thünen의 농업입지이론에서 출발하여 1933년 Christaller의 중심지이론을 거쳐 1961년 Wingo와 1964년 Alonso, 그리고 Mills(1969)과 Anas(1982)에 이르기까지 오랜 기간동안 이론적 토대를 탄탄히 쌓아왔다. 미시경제모델에서는 도시와 지역을 분석함에 있어 토지를 둘러싼 활동들(기업과 가구) 간 시장경쟁을 통한 수요와 공급의 균형을 전제로 하고 있다. 균형이 이루어진 이후 토지는 입찰자에게 효율적으로 배분되며, 시장으로의 접근성이 도시구조에서 토지를 배분하는 가장 핵심적 요소로 작용한다.

미시경제이론에서는 입지를 선정하는 과정에서 지대와 토지 가치가 어떻게 변화하는가에 초점을 두고 있다. 활동의 입지는 상품, 토지, 교통의 세 가지 기본 요소가 시장메커니즘을 통해 작동한다. 우선 토지는 생산활동과 주거를 위해 필요한 기본 요소인데 반해 교통은 잉여생산과 노동 이동에 필수적이다. 만일 농부가 잉여생산을 시장에 내다팔려고 하거나 혹은 노동자가 그의 노동력을 팔려고 한다면 교통서비스를 소비해야 한다. 즉, 상품을 시장에 내다 팔든지 또는 거주지에서 직장으로 이동하려면 교통서비스는 필수적이다.

미시경제모델에서 토지는 동질적인 무한한 평면으로 가정되며, 이 동질적인 평면에 차별적인 질(質)을 부여하는 것은 오직 통행비용과 접근성으로, 이들 요인이 토지의 가치를 결정짓는다. 토지이용에 관한 미시경제이론에서 활동의 입지나 지대를 결정하는 것은 전적으로 개별 가구와 기업이다. 개개의 활동들은 특정 규모의 부지를 선정하여 각각의 효용을 최적화한다고 가정하고, 토지를 소비하면서 각 입지에서 경쟁을 통해 지가가 결정된다. 이러한 접근방법이 Thünen(1826)의 입지론의 핵심이다. 그는 교통비용이 농업 생산자와 소비자 모두에 영향을 주며, 토지의 배분과정, 지대와 상품가격의 결정과정을 통제한다고 보았다. 그러나 튀넨의 고립국 이론에

는 단순화된 가정들이 상당히 많아 실세계에 적용하는데 어려움이 많았다. 이에 따라 활동입지 모델을 구축하는데 있어서 토지와 상품의 수요탄력성을 도입하려는 노력들도 이루어졌다.

하지만, 튀넨의 모델과 이 모델을 보다 확장한 미시경제모델은 토지시장과 상품시장 모두에서 균형을 이룬다는 가정을 전제로 하고 있다. Wingo와 Alonso는 예산제약선을 도입하고 교차 탄력성 개념을 발전시켰으나, 이러한 이론적 발전에도 불구하고, 공간미시경제모델은 실제 적용과정에서 현실에 부합하지 못하는 측면을 가지고 있다. Wilson(1974)은 공간미시경제모델의 작동성 또는 운영성이 없어 실증적 성과를 내지 못하고 있음을 비판하면서, 그 이유로 대다수 경제학자들이 이론적 틀을 구성할 때 선형 또는 대수선형의 계량경제 모델을 이용하고, 공간을 연속적인 변수로 다루고 있기 때문으로 보았다. 특히 연속변수로 공간을 다루는 다양한 모색을 시도했던 여러 학자들이 현실세계를 반영하고 재현하는데 성공하지 못하였음을 지적하였다. 그 결과 미시경제모델은 도시의 토지이용 및 도시경제학 분야에서는 큰 공헌을 하였으나 실제 활용적 관점에서는 유용하게 사용되지 못하고 있다.

공간미시경제모델은 분석의 초점을 개개인에 두고 있지만, 견고한 이론적 기반을 가지고 있으며, 완전경쟁을 전제로 한 시장체제와 균형 가설하에서 외부 조건이 동일하다면 장기적으로 시장은 매우 안정적인 상태를 취하게 될 것으로 보고 있다. 공간미시경제모델의 한계점을 보면 사용자와 공급자 모두 시장조건에 대한 완벽한 정보를 가지고 있고 입찰자와 공급자 모두 결정적 효용함수를 가지고 있다고 가정하여, 개인 행태에서의 다양성을 고려하지 않고 특정 상황에서 항상 동일한 선택을 하는 것으로 전제한다는 점이다. 그러나 공간미시경제모델의 가장 큰 문제는 수천, 수만의 개별가구와 기업, 토지소유주들이 모여있는 도시를 대상으로 하는 경우 고전적 균형이론에서 취하는 방법에 따른 개별 수요곡선을 총량화한 모델을 구축한다는 것 자체가 현실적으로 어렵다는 점이다. 실제로 수만에서 수백만에 이르는 도시에 거주하는 가구와 기업들을 총량화한 수요-공급 함수를 도출하는 것이 거의 불가능하다. 이러한 공간미시경제모델의 약점을 해결하기 위해 공간적 상호작용모델에 대한 연구들이 활발하게 이루어지게 되었다고도 볼 수 있다.

## 2. 공간적 상호작용모델

공간적 상호작용모델은 미시경제모델과는 반대로 개별적인 개체 단위로 분석하는 것이 아니라 많은 활동들과 공간을 그룹으로 집단화한다. 공간은 점 대신에 존(zone)으로 정의되고 주어진 각 존에서 다양한 활동들이 이루어진다. 또한 활동들도 그룹으로 집단화되며, 그룹내의 모든 개개인들은 유사한 특성을 지닌다는 것을 전제로 한다. 따라서 존별 저장(stock)은 다른 존들과의 상호작용을 하면서 다양한 유형의 유량(flow)을 발생시킨다. 즉, 존 간에 통행, 이주, 상품수송 등 구체적인 형태의 이동과 확산, 의존성, 기회 등 추상적인 특성을 지닌 형태의 흐름도 이루어진다.

공간적 상호작용 모델의 가장 기본적인 형태는 중력모델이다. Hansen(1959)은 거주지 입지를

고용으로의 접근성 함수로 분석하는 중력모형을 최초로 사용하였으며, Huff(1963)도 중력모형에 경제적 개념과 확률개념을 추가시키는데 공헌하였다. 그러나 공간적 상호작용모형의 발달사에서 가장 획기적인 공헌을 한 학자는 도시활동 상호작용 모형의 틀을 정립한 Lowry(1964)와, 엔트로피 극대화 방식을 도입하여 상호작용의 이론적 틀을 정립한 Wilson(1970)이다.

여기서는 주거부문과 고용부문의 상호작용을 통합한 라우리 모델을 간단히 고찰하고자 한다. 라우리는 도시활동에 대한 보다 포괄적인 설명을 위해 경제기반 이론과 승수개념을 사용하였다. 그는 활동 범주를 기반부문, 서비스부문, 주거부문으로 나누고 기반부문을 외생변수로 보았다. 라우리 모델의 목적은 주거 입지(R)과 각 존에서 기반부문의 생산활동으로 인해 발생하는 서비스 고용(E)을 추정하는 것이다. 기반부문 외의 외생변수로는 각 존에서 가용한 토지(L)와 교통비용 행렬(C: 접근도 행렬)이 있다. 라우리의 공헌은 <그림 1>에서 볼 수 있는 바와 같이 하위 모델들을 반복적인 계산체계 속에 통합함으로써 복잡한 구조를 작동시켰다는 점이다.

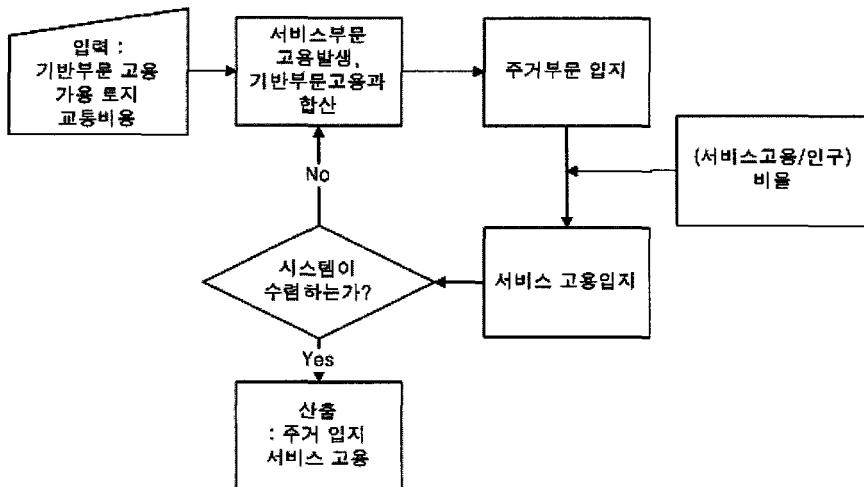
출발지 제약의 공간적 상호작용모형의 순차적 흐름을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

(가) 각 존의 총고용( $*E_i$ ) = 기반부문 고용( ${}^bE_i$ ) + 이전 반복회(回)에 할당된 서비스 고용( ${}^sE_i$ )

(초기화 시점에서의 서비스 고용은 0임).  $*E_i = {}^bE_i + {}^sE_i$

(나)  $i$ 존 직장으로부터  $j$ 존으로의 주거입지를 배분하면 다음과 같다.

$$R_{ij} = *E_i u A_{ij} L_j \exp(-\beta^r c_{ij}), \text{ 여기서 } A_{ij} = [\sum_j L_j \exp(-\beta^r c_{ij})]^{-1}$$



<그림 1> Lowry 모델의 기본 구조

(나)  $i$  존 직장으로부터  $j$  존으로의 주거입지를 배분하면 다음과 같다.

$$R_{ij} = *E_i u A_i L_j \exp(-\beta^r c_{ij}), \text{ 여기서 } A_i = [\sum_j L_j \exp(-\beta^r c_{ij})]^{-1}$$

$R_{ij}$ 는  $i$  존에서 일하는  $j$  존 거주자 수,  $u$ 는 고용/인구비(a population-to-employment ratio)이다.  $A_i$ 는  $\sum_j R_{ij} = E_i u$ 라는 조건을 만족시켜 주거입지를 정확하게 배분하기 위한 변수이며,  $\beta^r$ 은 주거 분포에 영향을 미치는 교통비용의 효과를 통제하는 계수이다. 따라서  $\beta^r \rightarrow \infty$ 일때 모든 거주자는 동일한 존에서 일하고 거주하게 되며,  $\beta^r$ 값이 작아지면 사람들은 직장 주변으로 분산하여 거주하게 되고,  $\beta^r$ 가 0이 되면 가용한 토지가 있는 전 지역에 동일한 밀도로 거주하는 분포를 형성하게 된다. 여기서  $R_{ij}$ 는 직장 $\leftrightarrow$ 주거지와와의 상호 작용 흐름을 나타내는데 전체 직장수에 대한  $j$  존 전체 거주자 비율로 변환될 수 있다 ( $R_j = \sum_i R_{ij}$ ).

(다)  $i$  존 거주지로부터  $j$  존으로의 서비스 고용을 배분하면 다음과 같다.

$$^s E_{ij} = R_i v A_i (W_j)^a \exp(-\beta^s c_{ij}), \text{ 여기서 } A_i = [\sum_j (W_j)^a \exp(-\beta^s c_{ij})]^{-1}$$

$v$ 는 서비스/인구비를 나타내고  $W$ 는 서비스 고용에 대한 그 존의 매력도를 나타낸다.  $W$ 의 경우 이전 반복회에서 해당 존으로 배분된 서비스 고용으로 서비스 활동의 집적을 나타낸다.  $a$ 값은 이러한 경향을 통제하는 변수로 규모의 경제를 나타낸다. 따라서 주거지 $\leftrightarrow$ 서비스의 흐름을 각 출발지에 더한다면 각 존의 전체 서비스 고용수가 산출된다( $^s E_j = \sum_i ^s E_{ij}$ ).  
(라) 다시 처음 단계(가)로 돌아가서 서비스 고용이 기반부문 고용에 더해진다. 이렇게 매번 반복 과정을 거치면서 거주자 수와 서비스 고용수가 추가되는데, 이러한 추가 증가분이 점점 줄어들어 아주 미미한 수준이 되면 수렴하게 되고 궁극적으로 균형상태에 도달하게 된다.

라우리 모델이 구축된 이후 이 모델을 보다 개선하기 위한 많은 연구들이 이루어졌다. 대표적인 연구로는 Wilson(1974)으로, 라우리 모델의 집단적 변수를 분할하기 위해 고용수  $E_j$ 와 주택수  $H_i$ 를 모두 알고 있다고 가정하여 다음과 같은 출발지-목적지 제약모델을 제시하였다.

$$R_{ij} = H_i E_i \exp(-\beta^r c_{ij}) A_i B_j \text{ 여기서 } A_i, B_j \text{는 출발지와 목적지 제약함수이다.}$$

이 모델을 통해 직장과 주거지가 모두 알려진 거주자 그룹의 경우 양쪽 제약 모델을 사용할 수 있으며, 만일 주거지는 알려졌으나 직장을 구하고 있는 거주자 그룹의 경우 출발지 제약 모델을, 직장 위치를 가지고 있으나 주거지를 찾고 있는 거주자의 경우 목적지 제약 모델, 그리고 직장과 주거지 모두 정해지지 않은 사람들은 제약없는 모델을 사용할 수 있도록 유연성을 높였다. Wilson은 존 간 교차통행량의 공간적 분산정도를 엔트로피로 정의하고 주어진 제약조건을 만족하면서 엔트로피를 극대화하는 해법을 제시하였다. 그는 엔트로피 극대값 미분에 사용할 여

러 제약들을 유도하여,  $i$ 존의 고용을 소득분위, 가구유형에 따라 나누어 배분하였으며, 주거비용과 교통비용이 각 소득분위 그룹의 최대치를 초과하지 않는 모델 정산(calibration) 방안도 제시하였다.

미시경제모델과는 달리 공간적 상호작용 모델에서는 공간은 물론 대부분의 다른 변수를 설정할 때도 이산변수를 사용하기 때문에 공간적 상호작용모델의 경험적 검증이 훨씬 더 수월하다. 그러나 공간적 상호작용모델은 설명적(explanatory)인 모델이 아니라 기술적(descriptive)인 모델이며, 미시경제모델에 비해 정교하지 못한 가정에 기반을 둔 경험적 이론이라고 볼 수 있다. 따라서 인과관계를 밝히는 데는 취약하며, 균형의 개념을 찾아보기 힘들고, 시장 메커니즘의 작동과정을 설명할 수 없다는 문제점을 지니고 있다.

### 3. 공간선택모델

공간미시경제모델의 단점을 극복하고 공간적 상호작용모델을 보완할 수 있는 방법에 대한 연구들이 1970년대 후반부터 활발하게 이루어졌다. 거시적 수준에서 체계의 행태와 미시적 수준에서 개별 행위자의 행태 간의 관계를 확립하려는 노력이 이루어지면서 이론적으로는 미시경제모델의 견고한 기반을, 경험적으로는 보다 작동성이 높은 공간적 상호작용모델을 혼합하려는 시도가 나타났다. 즉, 특정한 공간구조를 형성하게 되는 의사결정과정에서 제한된 합리성 가정을 도입하여 개개인이 인식하는 효용을 구체화함으로써, 공간적 상호작용 모델을 비용, 효용, 탄력성 등의 개념으로 해석가능하도록 미시경제의 이론적 모델을 공간적 상호작용 모델과 통합시키고자 하였다. 이러한 노력은 Domencich & Mcfadden(1975)의 이산선택모델(discrete choice model)과 무작위적 효용이론(random utility theory)으로 발전되어 나갔다. 특히 이산선택모델은 미시경제모델과 엔트로피 극대화에서 제공되는 통계적 해석을 연결시킨 모델로, 상당히 작동성이 강하면서도 경제적 설명력을 결합한 모델로 평가되고 있다. 실제로 Anas(1987)도 미시경제이론과 이산선택모델을 연계한 부동산시장의 메커니즘을 모델화하였다.

본 연구에서는 공간선택모델의 가장 핵심이 되는 무작위효용이론과 이산선택모델에 대해 간략히 고찰하고자 한다. 효용함수는 특정 개인과 그 개인의 선택권(option), 그리고 각 선택에 대한 측정가능한 속성치를 나타내는 변수로 구성된다. 개개인은 각각의 대안선택을 동일한 효용함수로 평가한다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u^{sk} = U^s(X^k, S^s), k \in B^s$$

여기서  $u^{sk}$ 는 개인  $s$ 가  $k$ 를 선택할 때 갖게 되는 효용수준이고  $U^s$ 는  $s$ 가 그에게 가용한 유사한 종류의 대안들 모두에 적용하는 효용함수이다. 효용함수를 구성하는 변수  $X^k$ 는 각 대안  $k$ 의 측정가능한 속성치이며  $S^s$ 는 개인  $s$ 의 사회·경제적 특성을 나타낸다.  $B^s$ 는  $s$ 가 사용할 수 있는 대안들을 포함하고 있는데 각 대안들은 대체관계를 갖는다. 사회·경제적 특성이 효용함수에 내



제되어 있다고 가정하면 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$u^{sk} = U^s(X^k)$$

만일 대안  $k$ 가  $U^s(X^k) > U^s(X^q)$ ,  $\forall q \in B^s$ ,  $q \neq k$ 의 조건을 만족하면 최대가 되는데, 이는 미시경제모델과 거의 같다고 볼 수 있다.

그러나 이런 방식으로 도시에 살고 있는 수많은 개개인들의 효용함수를 추정하는 것은 불가능하다. 따라서 개개인을 사회, 경제적 특성에 따라 그룹화하고 각 그룹의 선택권을 이산화하여 야만 현실적으로 적용가능하다. 즉, 계산 한계를 극복하기 위한 집단화(aggregation)와 현실적 해석가능성을 높이기 위한 이산화(discretion) 방법을 병행하는 것이다.

하지만 개개인을 집단화하여 효용함수를 추정하는 경우 동일 그룹 내의 인구수가 클수록 효용분포의 변이가 크게 나타날 것이다. 따라서 상대적으로 그룹내의 동질성을 높이기 위해 그룹의 수를 많게 하는 것이 바람직하나 실제적으로 가용한 데이터 활용과 계산 한계의 어려움을 고려하여 적절한 그룹 수로 나누어야 할 것이다. 이렇게 집단적 접근방법을 도입하는 경우 고유 효용함수를 가정하기 어렵다. 특정 개인도 매 순간 동일한 방식으로 효용을 느끼지 않으며, 개개인들은 항상 효용을 극대화하는 옵션을 항상 선택하는 것은 아니며, 상황에 따라 선택한 대안의 효용도 변화한다는 점을 고려해볼 때 그룹의 경우 결정적 효용 함수로 나타내는 것은 불가능하다. 이는 같은 그룹에 속한 사람들이라고 해서 각 대안에 대해 동일한 정보를 갖고 있지 않으며, 그룹화하기 위해 설정하는 기준이 범주화되기 때문에 같은 범주내에서도 최상위와 최하위 간에는 상당한 변이가 나타날 수 있기 때문이다. 뿐만 아니라 특정 존내에서 개개인의 위치가 다르기 때문에 동일한 존에서 개개인의 출발지와 목적지에 대한 효용이 다르게 표출될 수 있다. 따라서 그룹내의 개개인의 효용은 그룹내의 평균값을 중심으로 분산되어 분포한다고 보아야 한다. 만약 대상집단이 매우 동질적이라면 모든 구성원들은 동일한 방식으로 효용을 인지하게 되기 때문에 따라서 그 변이(variation) 폭은 매우 작을 것이다. 그러나 그룹이 크고 동질적이지 않다면 변이의 폭은 넓어질 것이다.

개개인들이 같은 파라미터를 가지고 각각의 대안을 인지한다고 전제하더라도 특정 집단내의 개개인이 주어진 세 가지 대안들 가운데 선호하는 대안 선택을 보면 반드시 선호도가 가장 높은 대안을 다 선택하지는 않는다. 일부 사람들은 선호도가 다소 낮은 대안을 선택하며, 소수의 사람들은 선호도가 가장 낮은 대안도 선택할 수 있다. 이는 집단 전체가 하나의 대안을 선택하는 것이 아니라 대안 간의 선택의 폭이 분산되어 분포됨을 말해주며, 따라서 개개 구성원들이 세 가지 대안을 선택하는 비율을 추정하는 확률모델을 구축할 수 있음을 시사해준다.

대안 선택의 분포를 확률적으로 유도해낼 수 있는 모델 구축을 위해 개개인의 결정론적 효용 함수 식에 집단의 총량적 효용수준을 나타내는 무작위적 요소를 포함시키려는 노력들이 이루어졌다. 즉,  $u^{sk} = U^s(X^k)$  식에 무작위적 요소를 추가하여 집단적 효용함수를 구축하는 것이다

$[u^k = U^s(X^k, \xi)]$ . 여기서  $\xi$ 는 효용함수에서 무작위적 요소를 나타내는 확률 변수이다. 이렇게 확률적 요소를 도입함으로써 그룹내의 개인들이 어떤 대안이라도 선택할 수 있는 가능성을 고려할 수 있다. 따라서 그룹  $s$ 가 대안  $k$ 를 선택할 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P^{sk} = \text{Prob}[U^s(X^k, \xi) > U^s(X^q, \xi)], \forall q \in B^s, k \neq q$$

이렇게 효용함수를 정해진 측정가능한 고유효용(strict utility)을 나타내는 결정론적 함수  $V^s(X^k)$ 와 확률함수  $\mu^s(X^k)$ 로 나타낼 수 있으므로  $[U^s(X^k) = V^s(X^k) + \mu^s(X^k)]$ , 최종적으로 집단적 효용함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$P^{sk} = \text{Prob}[\mu^s(X^k) - \mu^s(X^q) < V^s(X^k) - V^s(X^q)], \\ \forall q \in B^s, k \neq q$$

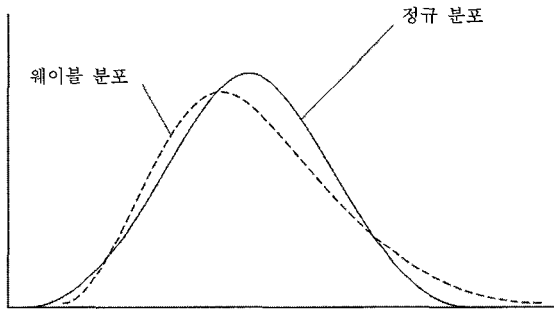
만약  $\mu^s(X^k)$ 가 그룹 내에서의 변이 수준을 나타낸다면, 모든  $\mu^s(X^k)$ 는 일반적인 복합분포(joint distribution)를 가진다고 볼 수 있다. 따라서  $\tau(t^1, t^2, \dots, t^N)$ 가  $\mu^s(X^k)$ 의 누적 복합분포이고  $\tau^k$ 는  $\tau$ 의  $k$ 번째 도함수라면, 대안  $k$ 가 선택될 확률은 다음과 같다.

$$P^{sk} = \int_{-\infty}^{+\infty} \tau^k(t + V^{sk} - V^{s1}, \dots, t + V^{sk} - V^{sN}) dt$$

이 식은 무작위적 효용(random utility)이라는 가정 하에서 이산결정(discrete decision)을 시뮬레이션할 수 있는 기본 모델이라고 볼 수 있다. 이 기본 모델을 토대로 하여 복합분포  $\tau$ 를 표현하는 여러 모형들이 도출되고 있다.

Domencich & McFadden(1975)은  $\tau$ 를 나타내는데 적합한 통계 함수들(정규분포, 로지스틱 분포, 코시 분포 등)을 검토하고, 이들 분포를 각각 적분한 프로빗, 로짓, 아크탄젠트 모델의 분포에 대해 폭 넓게 검증하였다. 만일 두 대안 중에서 선택하는 경우 복합분포를 가지는  $\mu^s(X^1)$ ,  $\mu^s(X^2)$  및 그 차이  $\mu^s(X^1) - \mu^s(X^2)$ 는 모델의 일관성을 위해 동일한 형태를 가져야 한다고 보았다. 이러한 관점에서  $\mu^s(X^1)$ ,  $\mu^s(X^2)$ 가 각각 정규분포를 이루면  $\mu^s(X^1) - \mu^s(X^2)$ 도 정규분포를 따르게 된다고 전제하였다. 이렇게 정규분포를 가정하는 경우 유도되는 선택모형이 프로빗 모형이다. 그러나 Domencich & McFadden은 로짓 모형은 이러한 속성을 가지지 못하기 때문에 이 문제를 해결하기 위해 웨이블 분포(Weibull distribution)로 대체하였으며, 웨이블 분포를 가정하는 경우 유도되는 선택모형이 바로 로짓모형이다. 정규분포와 웨이블 분포와의 차이를 보면 <그림 2>과 같이 다소 분포유형이 다름을 알 수 있다.

Domencich & McFadden은 웨이블 분포를 선택하여 로짓모형을 도출하였지만, 아직까지 로짓 모형과 프로빗 모형 중 어느 모형이 더 적합한가에 대해서는 논쟁의 여지가 있다. 그러나 로짓 모형이 훨씬 더 단순하고 정산(calibrate)하기 쉬우며, 많은 수의 대안들을 고려할 수 있기 때문에 로짓모형을 일반적으로 이용하고 있다. 따라서 만일 복합분포가 웨이블 분포라면 다항로짓모형



〈그림 2〉 정규 분포와 웨이블 분포의 비교

(Multinomial Logit Model)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P^{sk} = \frac{\exp(V^{sk} - \alpha^k)}{\sum_q \exp(V^{sq} - \alpha^q)}$$

여기서  $\alpha$ 는 일반화를 손상시키지 않으면서  $V^{sk}$ 의 정의에 포함될 수 있는 파라미터이다. 이 파라미터에 지수함수를 도입하면 집단이  $N$ 개의 대안들 가운데 특정한 대안  $k$ 를 선택할 확률을 나타내는 최종 다항로짓모형은 다음과 같다.

$$P^{sk} = \frac{\exp(\beta^s V^{sk})}{\sum_k \exp(\beta^s V^{sk})}$$

여기서 집단의 평균 효용(인지된 효용분포의 대수 평균)을 직접 추정할 수 있으며, 효용함수가 인지된 비용을 나타낸다면 통합비용(composite cost, log-sum) 또는 인지된 효용의 평균은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S^s = \frac{1}{\beta^s} \ln[\sum_k \exp(\beta^s V^{sk})]$$

만약 두 대안적 정책(A, B)을 수립하는 경우 두 정책 간 편익의 차이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta S^s = \frac{-1}{\beta^s} \ln \left[ \frac{\sum_k \exp(\beta^s V^{sk}) A}{\sum_k \exp(\beta^s V^{sk}) B} \right]$$

여기서  $\Delta S^s$ 는 경제학에서 일컬어지는 소비자 잉여(consumer surplus) 지표와 같으며, 대안들을 평가하는데 큰 도움이 된다. 여기서  $\beta^s$  값이 음수로 상당히 클 경우, 의사결정 그룹이 작고 동질적인 경우로서, 그룹내의 개개인들은 최선의 대안 선택에 대해 상당히 동의하고 있는 분포를 보이고 있음을 의미한다. 따라서 연구대상도시를 상당히 많은 수의 존으로 구분하는가 또는 많은 구성원을 가진 적은 수의 존으로 구분하는가에 따라  $\beta^s$  값은 상당한 차이를 보일 수 있다.

지금까지는 하나의 특정한 대안을 선택하는 경우만을 고려하였다. 그러나 실제 도시에 살고 있는 사람들은 서로 연관되어있는 일련의 대안들을 선택하게 된다. 일례로 도시 공간에서 이루어지는 전형적인 대안 선택의 사슬을 보면 ‘직장 → 거주지 → 쇼핑 → 교통수단’이라는 의사결정과정의 순차적으로 연결된다. 사람들은 직장에서 집으로, 또한 쇼핑센터로 가며, 교통수단을 선택하게 된다. 출발점인 직장으로부터 순차적으로 이루어지는 사슬은 이전의 대안 선택에 영향을 받으며, 선택된 대안은 우측에 있는 대안 선택보다 먼저 발생한다. 연결사슬에 따른 각 대안 선택은 직장 →  $P(r)$  →  $P(s)$  →  $P(m)$ 과 같은 확률값을 가지게 된다. 즉, 특정 존에서 일하는 사람들 중 거주지에서 버스를 타고 쇼핑을 하러 가는 사람수는(그 존에서 일하는 사람수) ×  $P(r)$  ×  $P(s)$  ×  $P(bus)$ 이다. 이 방법은 독립 다항로짓모형을 사용하여 연결사슬의 각 대안 선택을 확률적으로 계산할 수 있어 편리하다. 그러나 이 경우 각각의 연결사슬에 따라 선택된 대안들은 상호독립적이어야 한다. 즉, 특정 대안을 선택할 확률은 효용 혹은 가치라는 대안 자체의 특성에만 영향을 받는 것이고, 다른 대안의 선택 확률에는 영향을 주지 않아야 한다.

그러나 문제는 각 대안의 선택이 서로 독립적이지 못하고 영향을 줄 수 있다는 점이다. 위의 예에서 어느 지역으로 쇼핑하러 갈 지 결정하는 것은 좋은 버스 서비스가 있기 때문일 수도 있다. 따라서 교통수단의 선택이 쇼핑센터의 선택에 영향을 줄 수 있다. 이러한 점을 고려하기 위해서 연산과정은 연결사슬의 마지막 대안 선택에서 시작하여 거꾸로 진행되어야 한다. 예를 들어 전체 주거지에서 쇼핑하러 가는데 필요한 교통수단의 선택가능성은 통행거리, 통행시간, 경비 등의 비용요소를 종합한 통합비용을 계산해야 한다. Williams(1977)는 이러한 점을 고려한 통합비용 함수, 즉 일반화비용(*generalized cost*)을 산출하는 식을 도출하였다.

$$S^m = \frac{1}{\beta^m} \ln \left[ \sum_k \exp(\beta^m V^k) \right]$$

여기서  $S^m$ 은 집단화된 통행 효용이며,  $\beta^m$ 은 교통수단 선택을 통제하는 파라미터이고  $V^k$ 는 각 수단  $k$ 의 고유효용이다. 이렇게 각 출발지-목적지와 의사결정 집단들의 선택가능한 모든 교통수단을 합계함으로서 통행효용을 추정하는 것이다.

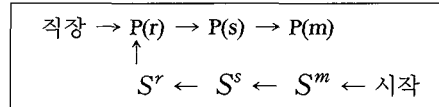
만일 쇼핑선택의 고유효용은 오직 가용한 교통수단에 의해서만 결정된다고 하면, 특정 주거지역에서 모든 쇼핑시설에 대한 집단적 효용은 다음과 같다.

$$S^s = \frac{1}{\beta^s} \ln \left[ \sum_m \exp(\beta^s S^m) \right]$$

여기서  $S^s$ 는 집단적 쇼핑 효용,  $\beta^s$ 는 쇼핑장소 선택을 통제하는 파라미터,  $S^m$ 은 각 쇼핑장소의 고유효용이다. 거주지에 대해서도 이와 유사한 접근이 가능하다. 거주지 결정의 고유효용은 오직 가용한 쇼핑센터에 의해서만 결정된다고 하면 주거 입지의 집단적 효용은 다음과 같다.

$$S^r = \frac{1}{\beta^r} [\sum_s \exp(\beta^r S^s)]$$

이러한 방식으로 교통 요소는 쇼핑 효용 추정으로 이전되고 이는 다시 주거 효용 추정으로 이전된다. 이렇게 연결사슬의 최상위에 도달하면, 계산 순서는 반대방향으로 진행하여 연결사슬의 원래 방향대로 확률을 계산하게 된다.



이러한 연결사슬로 이루어진 선택확률을 추정하는 경우 기존의 로짓모형은 상당히 한계성을 갖게 된다. McFadden(1973)은 각 대안들에 대한 효용함수가 서로 독립적이어야 한다는 제약을 해결하고 각 대안의 효용함수가 상호독립성을 가정하지 않고 연결사슬 형태의 선택확률을 추정할 수 있는 네스티드 로짓모형(nested multinomial logit models)을 제시하였다. 이 모형은 대안 선택에 대하여 다수의 계층을 두고 이들을 계층별로 별개의 선택모형을 사용하여 선택확률을 단계적으로 추정할 수 있기 때문에 복잡한 도시활동 및 교통체계에서 다양한 선택을 요구하는 상호의존적인 행태를 추정하는데 적합한 모형이다.

그러나 선택된 대안의 효용함수를 추정하는 경우 비용자체가 변화하고 탄력성 개념이 개입되는 경우 문제는 더욱 복잡해진다. 특히 교통수단 선택에 있어서 비용의 변화는 용량(capacity)과 관계가 있다. 예를 들어, 버스 서비스 이용자수가 주어진 공급 용량을 초과한다면 이용자들이 다른 교통수단을 선택하기 전에 통행비용(혹은 통행시간)이 상승한다. 이러한 비용변화는 쇼핑 장소나 거주지 입지 선정에 영향을 주게 된다. 또한 주거지 선택에 있어서도 제한된 용량은 지가상승으로 이어져 비용에 변화를 준다. 뿐만 아니라 수요탄력성 역시 효용함수를 추정하는데 상당히 영향을 주게 된다. 일례로 쇼핑센터로 운행하는 버스가 정체될 경우 고객의 통행 자체가 줄어들게 되며, 이는 쇼핑 횟수를 줄이게 되므로 자연히 통행발생이 감소하게 된다.

이러한 비용 변동과 수요탄력성을 반영하기 위해서는 계산과정이 반복적으로 이루어져야 한다. 먼저, 효용은 연결사슬을 거꾸로 거슬러 올라가면서 집단화되고 확률은 정방향으로 추정된다. 일단 수요가 모든 대안들에 할당되면 비용은 수요-공급 관계에 따라 조정된다. 만약 각 대안에 대한 비용이 수정된다면, 집단적 효용은 다음 반복 회에서 다시 추정되어야 한다. 따라서 모든 일련의 절차가 반복회를 거치게 된다. 매회의 반복과정에서 확률 계산값이 바뀌게 되고 배분되는 수요의 양도 달라진다. 이러한 반복과정은 수렴할 때까지 이루어지는데, 수렴화는 이전 반복 회와 금번 반복회 간의 비용 변화를 기준으로 판단할 수 있다.

### III. 토지이용-교통 통합모델의 운용 메카니즘<sup>2)</sup>

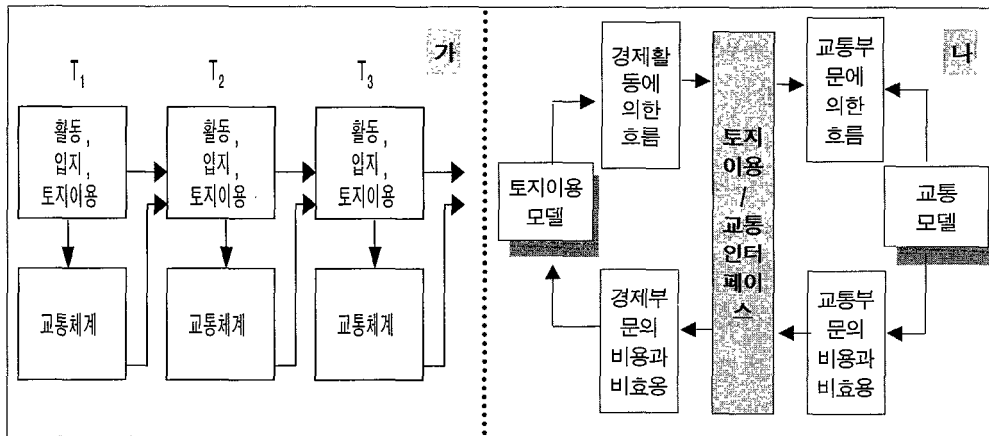
#### 1. 토지이용-교통 통합모델의 전체 구조

앞에서 살펴본 토지이용-교통 통합모델의 이론적 기초를 토대로 하여 실제 작동가능도록 프로그래밍화한 대표적인 토지이용-교통 통합모델인 TRANUS를 사례로 하여 통합모델의 운용 메카니즘을 살펴보고자 한다. TRANUS는 de la Barra와 B. Perez가 1982년부터 개발하기 시작하였으며, 현재 de la Barra가 운영하는 Modelistica사에서 소프트웨어를 제공하고 있다. TRANUS는 미국과 유럽 뿐만 아니라 남미와 일본 등의 여러 지역에서 사용되고 있으며, 2005년부터 이 프로그램에 대한 사용권이 자유로워지면서 웹상에서 무료로 다운받을 수 있다.

TRANUS는 공간미시경제모델, 공간적 상호작용모델, 이산선택모델, 투입-산출 모델, 교통모델 등을 토대로 하여 토지이용과 교통체계간의 환류를 통한 동태적 시뮬레이션을 수행할 수 있는 시스템이다. TRANUS는 토지이용 모델과 교통모델로 구성되어 있으며, 시간의 흐름에 따라 토지이용과 교통간에 상호작용 회로가 이루어진다. 다양한 활동들이 준별로 입지하게 되면, 이러한 수요는 부동산 시장의 토지, 연면적 등의 공급 수준을 고려하면서 흐름행렬을 유발한다. 이 흐름행렬은 교통모델에서 통행행렬로 변형되어 통행수요를 결정하며, 이는 교통수단과 교통시설의 공급 용량과 연결된다. 주어진 교통수요와 교통공급체계 간에서 비용과 접근성이 결정되면, 이는 다시 피드백하여 토지이용 모델에 영향을 주어 다음 시점에서 활동입지와 토지이용에 변화를 주게 된다. 토지이용-교통체계간의 이러한 피드백 과정은 같은 시점에서는 일어나지 않고 시차를 두고 다음 시점에 영향을 주게 된다. 즉, <그림 3>의 '가'에서 볼 수 있는 바와 같이  $t_1$  시점에서의 교통 접근성은 다음 시점인  $t_2$ 에서 흐름의 분포에 영향을 준다, 그러나 한 시점에서 다음 시점 간에 토지이용의 변화는 초기 관성요소도 있기 때문에 교통모델에서의 변화는 여러 시기에 걸쳐 영향을 미칠 수도 있다. 특히 새로운 도로 건설, 대중교통체계 등등 교통체계에서의 변화는 교통수요에 즉각적인 영향을 줄 뿐만 아니라 다음 시점에서의 활동 입지, 토지이용, 부동산 시장에도 영향을 준다. 반면에 특정 경제부문의 성장, 새로운 토지공급 및 건축물 투자 등의 토지이용의 변화는 같은 시점에서의 교통수요에 영향을 준다. <그림 3>의 '나'는 이러한 일련의 과정을 나타낸 것으로, 토지이용 모델과 교통모델을 연결시켜주는 인터페이스 모듈이 두 모델을 통합시키는 중요한 역할을 하고 있다.

토지이용-교통 통합모델에서는 입지를 선택하는 활동이나, 교통수단과 노선을 선택하는 통행 결정에 효용함수가 이용된다. 일단 효용함수가 정의되고 나면, 의사결정자들이 주어진 대안들 가운데 특정한 대안을 선택하는 확률을 추정하기 위해 다항로짓모형을 이용한다. 토지이용과 교

2) 토지이용-교통 통합모델의 작동 메카니즘에 대해서는 TRANUS: Integrated Land Use and Transport Modeling System(Documentation)을 주로 참조하였음.



〈그림 3〉 토지이용-교통 통합모델의 대표적 시스템인 TRANUS의 구조

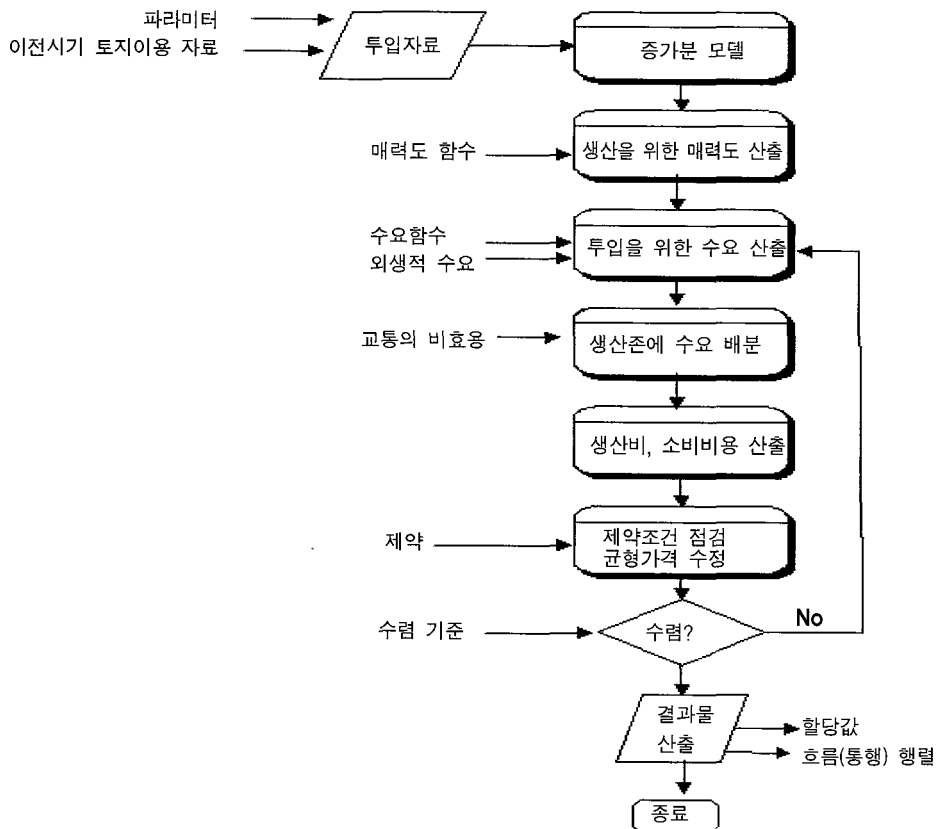
통체계에서 제한된 토지공급량이나 교통망에서의 공급능력의 한계와 같은 제약조건이 존재하므로, 수요탄력성과 균형가격 개념이 도입된다. 즉, 특정 재화에 대한 소비는 탄력적 수요함수를 통해 정의된다. 특정재화에 대한 수요가 공급량을 초과하면 반복적 알고리즘 과정에서 재화의 균형가격이 올라가게 되는 반면에 공급이 수요를 초과하면 가격은 떨어지게 된다. 특정한 대안에서의 가격 변화는 대안 선택 확률에 영향을 미치게 되고 이는 소비탄력계수에 따라 소비량을 변화시키게 된다. 예를 들어 토지소비의 경우 다양한 활동들이 주어진 특정 존에서 토지를 소비하려고 선택하는 경우 토지가격이 상승하게 되며, 이는 결과적으로 반복회(回)를 거치면서 보다 토지가 풍부한 지역으로 입지를 변화하거나 소비하려는 토지량을 줄이게 되어 반복과정이 거듭됨에 따라 수요-공급이 균형을 이루게 되는 작동 메카니즘을 가지고 있다.

## 2. 토지이용모델의 작동구조

TRANUS의 토지이용 모델은 공간적 투입-산출모델을 기반으로 하고 있다. 따라서 연구목적과 데이터베이스 가용성 여부에 따라서 투입-산출 부문의 복잡성 정도를 조정할 수 있다. 대상지역은 존(zone)으로 나누어지며, 외부존과 내부존으로 구분된다. 활동 부문은 경제 범주(산업별), 생산요소(노동, 자본), 토지(연면적) 등으로 구분되며, 각 부문은 생산(외생, 내생), 생산비, 수요, 소비가격, 부가가치, 제약, 균형가격 등의 변수를 갖는다. 특정한 부문과 특정 존에서의 생산은 다른 경제부문과 존으로부터의 투입량을 필요로 한다. 각 부문들은 투입비용과 생산존과 소비존간의 통행비용에 따라 달라지는 수요함수를 통해 서로 상호작용을 하게 되며, 이는 경제부문간의 거래, 고용 유발, 서비스에 대한 수요, 토지소비에 영향을 미치게 된다. 이러한 거래는 O-D행렬로 산출되고, 후에 교통모델에서 통행 수요로 변환된다. 일례로, 생산존으로부터 고용 창출은 직장으로 통행을 유도하거나 다른 생산부문의 소비를 유발하여 상품의 이동을 가져온다. 이 때 특

정 부문에서의 단위당 비용은 모든 투입요소의 합계와 수송비 및 부가가치 등을 합산하여 산출된다. 만일 특정 존 또는 부문에서 생산활동에 제약이 가해지게 되면(특히 토지나 연면적이 제약조건이 될 수 있음) 균형가격에 도달하기 위해 시뮬레이션 과정을 거치게 되며, 이 과정에서 토지가격 변화나 임대료의 변화를 가져오게 된다. 이와 같은 토지이용모델의 운용 구조를 크게 5단계 순차적 과정으로 나타내면 <그림 4>와 같다.

1단계: 외생 변수의 증가분을 결정하고, 매력도에 따라 생산입지를 배분한다. 토지이용 모델의 첫 단계에서는 활동의 각 부문과 존에서의 외생 변수들의 증가분을 추정한다. 여기서 외생 변수란 외부 수요에 의해 주어지는 것으로, 모델에 의하여 시뮬레이션되지 않는다. 일반적으로 기반 부문에서의 최종수요와 그로부터 유도된 비기반부문 및 인구증가는 투입-산출모델을 통해 산출 가능하다. 즉, 외생적으로 주어진 기반부문 고용과 기술계수  $a^{mm}$ 을 이용하여 유발된 고용과 인구수를 산출할 수 있다. 연구자는 각 존에 외생적으로 고용 증가분을 배분할 수 있으며, 따라서 특정 존에 대한 토지이용 정책의 효과를 평가할 수 있다. 이렇게 활동과 고용의 증가가 이루



<그림 4> 토지이용 모델의 운용 구조



어지면, 그에 따른 연면적과 토지 공급의 증가를 필요로 하게 된다. 연면적 증가분 입지를 위한 효용함수는 이전 시기의 연면적과 토지가치, 그리고 잠재적 연면적 등을 고려하게 된다. 여기서 토지의 가치는 토지이용의 밀도를 고려하여 토지 단위면적에 대한 건축가능한 연면적을 고려하여 산출할 수 있으며, 이는 토지이용규제에 따라라도 달라질 수 있다(TRANUS에서는 토지가치를 월 임대료로 환산하여 사용함). 잠재적 연면적이란 해당 존에 실제로 증가될 수 있는 연면적으로, 토지이용규제를 고려한 최대 가능 연면적과 이전 시기에 구축된 연면적의 차이라고 볼 수 있다.

초기화(base year) 이후 각 시기별로 증가분 모델(Incremental model)에 정산되어야 하는 외생 변수들로는 외생적 생산과 소비, 생산용량, 수출, 수입, 초기 매력도 등이다.  $t-1 \sim t$  기간 동안  $i$  존  $n$ 부문에서의 증가분을 고려한 외생변수  $H_i^{n,t} = H_i^{n,t-1} + \Delta H_i^{n,t}$ 이다. 만일 연구대상지역 전체의 증가분을 각 존에 배분하려는 경우 각 존의 배분비율은 매력도 함수를 통해 산출 가능하다.  $t$ 시점  $i$ 존  $n$ 부문의 외생적 생산( $X_i^{*n,t}$ )은  $t-1$ 시점의 생산과  $t-1 \sim t$ 시점 동안의 외생적 생산 증가분으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_i^{*n,t} = X_i^{*n,t-1} + \Delta X_i^{*n,t} \rho_i^{n,t} + \Delta X_i^{*n,t}$$

여기서  $\Delta X_i^{*n,t}$ 는  $t$ 시점  $i$ 존  $n$ 부문 외생적 증가분이며,  $\rho_i^{n,t}$ 는  $t$ 시점  $i$ 존의  $n$ 부문에 배분되는 증가분의 비율이다. 대상지역 전체 증가분 중 각 존에 할당되는 비율은 매력도 함수( $A_i^{n,t}$ )로 나타낼 수 있다.

$$\rho_i^{n,t} = \frac{A_i^{n,t}}{\sum_i A_i^{n,t}} \Rightarrow A_i^{n,t} = \sum_k b^{nk} \left( \alpha^{nk} \tilde{X}_i^{k,t-1} + \beta^{nk} p_i^{k,t-1} + \chi^{nk} Q_i^{k,t-1} \right)$$

여기서  $b^{nk}$ 는  $n$ 부문을 유인하는  $k$ 부문의 상대적 가중치,  $\tilde{X}_i^{k,t-1}$ 는  $t-1$ 의 총생산  $k$ (외생+파생된 생산),  $p_i^{k,t-1}$ 은  $k$ 부문,  $t-1$  시점의 가격,  $Q_i^{k,t-1}$ 는  $k$ 부문,  $t-1$ 기간의 초과용량이며, 기타 파라미터들은 입지를 유인하는 요소들의 중요성을 나타내는 초기 매력도 계수이다. 유발된 생산활동이 이루어지기 위해 각 존별로 생산활동이 입지할 수 있는 매력도가 어느 정도인가 계산되어야 하며, 매력도 수준은 반복회 과정이 시작되기 전에 미리 계산된다(〈그림 4〉 참조).

**2단계: 유발된 수요를 계산한다.** 유발된 생산활동이 각 존에 배분되고 나면 두 번째 단계에서는 각 존에서 필요한 수요(소비)를 추정한다. 특정 부문의 단위생산을 위해 필요한 다른 부문으로부터의 투입량은 수요함수에 의해 결정된다. 수요함수 모형은 고정수요, 가변수요, 대체재 가용성을 포함할 수 있다. 수요함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_i^{mn} = \min^{mn} + \left( \max^{mn} - \min^{mn} \right) \cdot \exp \left( -\delta^{mn} U_i^n \right)$$

여기서  $a_i^{mn}$ :  $i$ 존에서  $m$ 부문 한 단위를 생산하는데 투입되는  $n$ 부문의 총량

$\min^{mn}$ :  $m$ 의 한 단위 생산에 필요한  $n$ 의 최소량

$\max^{mn}$ :  $m$ 의 한 단위 생산에 필요한  $n$ 의 최대량

$\delta^{mn}$ :  $n$ 의 투입비용에 대한  $m$ 의 탄력계수

$U_i^m$ :  $i$ 존에서  $n$ 에 대한 소비의 비효용

일례로,  $n$ 의 최대량과 최소량이 각각 50, 10이고 탄력계수가 서로 다른 경우의 수요함수를 보면 <그림 5>와 같다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 탄력계수에 따라 주어진 비용에서도 수요가 상당히 달라짐을 엿볼 수 있다.

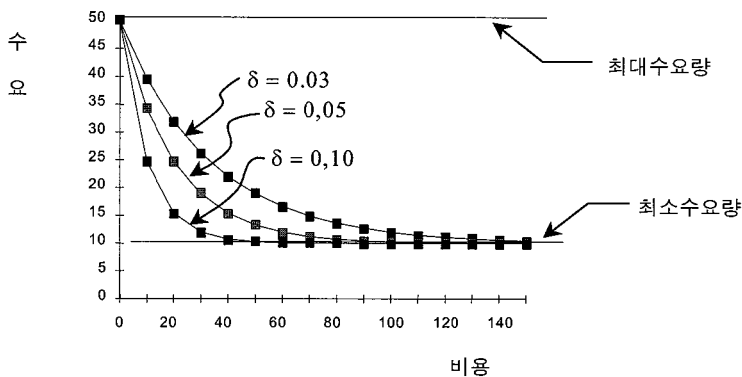
만일 대체재 사용이 가능한 경우 수요함수에 적용되는 비율은 다항로짓모형을 이용해 추정될 수 있다.

$$S_i^{mn} = \frac{\exp(-\delta \tilde{U}_i^{mn})}{\sum_k \exp(-\delta \tilde{U}_i^{mk})} \quad \forall k, n \in K^n$$

여기서  $k^n$ 는  $n$ 에 대한 모든 대체재이며, 따라서 대체재 모델로 복합적 효용함수( $\tilde{U}_i^{mn}$ )를 나타낸다면 아래의 식과 같다.

$$\tilde{U}_i^{mn} = \frac{a_i^{mn} \tilde{c}_i^n \varpi^{mn}}{\left[ \min_k (a_i^{mk} \tilde{c}_i^k \varpi^{mk}) \right]^{\theta^m}}$$

$a_i^{mn} \tilde{c}_i^n$ 는  $i$ 존에서  $n$ 의 소비비용  $\times$   $m$ 부문에서 기꺼이 소비하려는  $n$ 의 총량으로, 총지출을 나타낸다. 이 식에서 최선의 대안선택에 대한 효용의 복합 분포는  $\theta^m$ 의 값에 따라 달라진다.  $i$ 존에서  $m$ 부문 생산을 위해 필요한  $n$  투입량( $D_i^{mn}$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



<그림 5> 탄력계수에 따른 수요의 변화

$$D_i^{mn} = (X_i^{*m} + X_i^m) a_i^{mn} S_i^{mn}$$

여기서  $X_i^{*m}$ :  $i$ 존내  $m$ 부문의 외생적 생산

$X_i^m$ :  $i$ 존내  $m$ 부문의 유발된 생산( $\therefore X_i^{*m} + X_i^m = i$ 존의  $m$ 부문의 총생산)

$a_i^{mn}$ :  $i$ 존내  $m$ 부문의 단위 생산에 필요한  $n$ 부문의 총량

$S_i^{mn}$ : 다른 대체재들 대신에  $n$ 이 선택될 확률

따라서  $i$ 존의 모든 부문의 생산을 위해 소요되는  $n$ 부문 투입량( $D_i^n$ : 총수요량)은 다음과 같다.

$$D_i^n = \sum_m D_i^{mn} + D_i^{*n} \quad (D_i^{*n}: n \text{ 부문에 대한 외생수요}).$$

**3단계: 생산비 산출과 유발된 생산을 위한 입지를 배분한다.** 세 번째 단계에서는 생산비가 계산되고, 유발된 생산을 위한 입지를 배분하는 작업이 이루어진다. 생산비용은  $i$ 존에서  $m$  부문 한 단위를 생산하기 위해 필요한 모든 투입요소의 비용과 생산을 위해 소요되는 부가가치를 합산하여 계산된다.

$$c_i^m = \left( \sum_n D_i^{mn} \tilde{c}_i^n \right) + VA_i^m$$

( $VA_i^m$ :  $m$  부문 생산을 위한 부가가치,  $\tilde{c}_i^n$ : 투입요소의 소비비용)

각 존별로 필요로 하는 생산량이 추정되면, 이를 생산존으로 배분해야 한다. 유도된 활동부문들이 토지를 소비하는 부분인지, 아니면 토지를 소비하지 않는 부분인가를 먼저 결정한다. 만일 이동불가능한 부문(토지)라면 모든 생산은 수요가 발생된 존에서 이루어져야 한다. 그러나 이동가능한 활동부문이라면 수요는 각 존의 효용함수에 의해 결정되는 다항로짓모형을 이용하여 생산존에 배분된다. 각 존의 효용함수( $j$ 존에서 생산한  $n$ 부문을  $i$ 존에서 소비하는데 드는 비용)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{ij}^n = \lambda^n (p_j^n + h_j^n) + t_{ij}^n$$

$p_j^n$ : 생산존  $j$ 에서  $n$ 부문의 가격,

$h_j^n$ : 생산존  $j$ 에서의  $n$ 부문의 잠재가격

$t_{ij}^n$ : 생산존  $j$ 에서 소비존  $i$ 로의  $n$ 부문의 교통 비효용

$\lambda^n$ : 가격 대비 교통 비효용의 상대적 중요도를 규제하는 계수

잠재가격은 모형의 정산과정에서 추정되며, 최선의 대안 선택에 대한 복합 효용함수는 다항로짓모형에 반영되어  $i$ 존에서 필요로 하는  $n$ 부문의 생산이  $j$ 존에 입지하게 될 확률( $P_r^n$ )을 계산하게 된다.

$$Pr_{ij}^n = \frac{(A_j^n)^{\alpha^n} \cdot \exp(-\beta^n \tilde{U}_{ij}^n)}{\sum_j (A_j^n)^{\alpha^n} \cdot \exp(-\beta^n \tilde{U}_{ij}^n)}, \quad X_{ij}^n = D_i^n Pr_{ij}^n$$

여기서  $X_{ij}^n$ : 소비존  $i$ 의 활동에 의해 유발되어 생산존  $j$ 에 배분된  $n$ 부문의 생산

$A_j^n$ :  $j$ 존의  $n$ 부문 생산에 대한 매력도 계수

$\alpha^n$ :  $n$ 부문 입지에 대한 효용 대비 매력도의 상대적 중요도를 결정하는 계수

$\tilde{U}_{ij}^n$ :  $i$ 존의 수요를 충족시키기 위한  $j$ 존의  $n$ 입지에 대한 복합 효용함수

$\beta^n$ : 다항로짓모형에서의 분산도 파라미터

만일 소비존  $i$ 가 내부 존이라면, 모든 존(내부 존과 외부 존)에 배분된다. 그러나 소비존  $i$ 가 외부 존이라면(수출), 내부 존에만 배분된다. 따라서 각 존에 배분되는 총 유발수요는 모든 수요 존의 수요를 합산하여 산출될 수 있다( $X_i^n = \sum_j X_{ij}^n$ ).

**4단계: 소비 비용 및 소비 비효율을 계산한다.** 이렇게 수요가 생산존에 배분되고 나면 네번째 단계에서는 소비 비용과 소비 비효율을 계산하게 된다. 소비비용이란  $i$ 존에 입지한  $m$ 부문이  $n$  투입요소 한 단위를 얻기 위하여 지불해야 하는 총비용이다. 구매자들은 공간적으로 분포되어 있으므로 소비 비용( $c_i^n$ )은 각 생산존에서 지불된 가격에 교통비를 가중한 평균값으로 산출한다.

$$\tilde{c}_i^n = \frac{\sum_j X_{ij}^n (p_j^n + tm_{ij}^n)}{\sum_j X_{ij}^n}$$

여기서  $X_{ij}^n$ :  $i$ 존에서 소비되고  $j$ 존에서 생산되는  $n$ 부문의 생산량

$p_j^n$ : 생산존  $j$ 에서의  $n$ 의 단위가격,

$tm_{ij}^n$ : 생산존  $j$ 로부터 소비존  $i$ 까지  $n$ 부문 한 단위를 운송하는데 드는 화폐 비용

한편  $i$ 존에서  $n$ 을 소비하는 비효율은 생산존으로 배분하는데 있어서 사용된 비효율의 대수평균으로 나타낼 수 있다.

$$U_i^n = -\frac{\ln Pg^n}{\beta^n} (\min_j U_{ij}^n)^{\theta^n}, \quad Pg^n = \sum_{j=1}^J G_j \prod_{h=1}^{j-1} (1 - G_h), \quad G_j = \exp(-\beta \tilde{U}_{ij}^n) \big|_i \text{다.}$$

( $G_j$ 는  $j$ 존에 입지한  $i$ 수요를 생산할 확률 계산에서 지수로 정의됨)

**5단계: 제약조건을 점검하여 균형가격을 조정한다.** 다섯번째 단계에서는 제약조건을 조사하여 균형가격을 조정하게 된다. 각 존에 배분된 각 부문의 생산량은 생산활동을 위한 최대 또는 최소 용량에 의해 제약받을 수 있다. 만일 존에 배분된 생산이 생산용량의 아무런 제약을 받지 않

는다면 가격은 생산비에 부가가치를 더하여 산정된다. 따라서 아무런 제약조건이 없다면 균형가격은 소비가격과 같아지게 되고 수렴하게 된다. 그러나 생산이 가용한 용량을 너무 초과하거나 최소 수준에도 미치지 못하게 된다면 가격은 수요-공급간의 균형을 이루기 위해 반복과정을 거치게 된다. 제약조건을 기준으로 반복회를 거듭하면서 가격을 조정하게 된다. 만일 최대 제약조건을 위배하게 되면 가격은 올라가는 반면에, 최소 제약조건을 위배하면 가격은 떨어지게 된다. 마지막 반복회에 도달하면 균형가격에 수렴하게 된다. 반복과정이 시작되면 현재 반복회는 이전 반복회에서 할당된 생산을 위한 투입요소의 수요를 계산한다. 이 때 수요는 소비비용에 대한 탄력계수를 사용하는 수요함수를 토대로 산출된다. 각 수요준과 수요부문에 의해 투입요소 전체 수요가 결정되며, 이는 다시 로짓모델에 내재된 매력도 요인과 효용함수에 따라서 생산준과 생산부문에 할당된다. 이 할당과정에서는 외부준으로부터의 수입 가능성도 고려된다. 이렇게 수요가 할당되면, 투입요소 비용의 합계와 교통비용과 부가가치 비용을 합친 생산비가 계산된다. 가격은 다음과 같은 식을 통해 조정된다.

$$p_j^{n,t} \left\{ \begin{array}{l} < p_j^{n,t-1}, (X_j^{*n} + X_j^n) < Rmin_j^n \\ > p_j^{n,t-1}, (X_j^{*n} + X_j^n) > Rmax_j^n \\ = c_j^{n,t}, Rmin_j^n = 0, Rmax_j^n = \infty \end{array} \right\}$$

$p_j^{n,t-1}$ :  $t-1$  이전 반복회에서  $j$ 준의  $n$ 부문의 단위가격  
 $p_j^{n,t}$ :  $t$  현재 반복회에서  $j$ 준의  $n$ 부문의 단위가격  
 $Rmax_j^n, Rmin_j^n$ :  $j$ 준의  $n$ 부문 생산의 최대, 최소 제약조건  
 $C_j^{n,t}$ : 현재 반복회에서  $j$ 준의  $n$ 부문의 생산비  
 $X_j^{*n} + X_j^n$ :  $n$ 부문의 총생산(외생 생산+유발생산)

-마지막 단계는 수렴화 과정이다. 매 반복회마다 가격과 생산의 수렴화 수준이 계산되며, 이전 반복회에 비해 현재 반복회에서 산출된 가격과 생산의 차이를 각 준과 각 부문별로 계산한다. 가격수렴 지수( $Cp_j^{n,t}$ )와 생산수렴 지수( $CX_j^{n,t}$ )은 아래와 같은 식을 통해 계산되며, 가장 변이가 심한 준의 값을 채택한다. 산출된 수렴지수가 미리 정해놓은 수렴기준(예: 0.001 오차)보다 작거나 정해놓은 최대반복회수에 도달하게 되면 반복계산이 종료되고 수렴하게 된다.

$$Cp_j^{n,t} = \max_j \left| \frac{p_j^{n,t} - p_j^{n,t-1}}{p_j^{n,t-1}} \right|, \quad CX_j^{n,t} = \max_j \left| \frac{X_j^{n,t} - X_j^{n,t-1}}{X_j^{n,t-1}} \right|$$

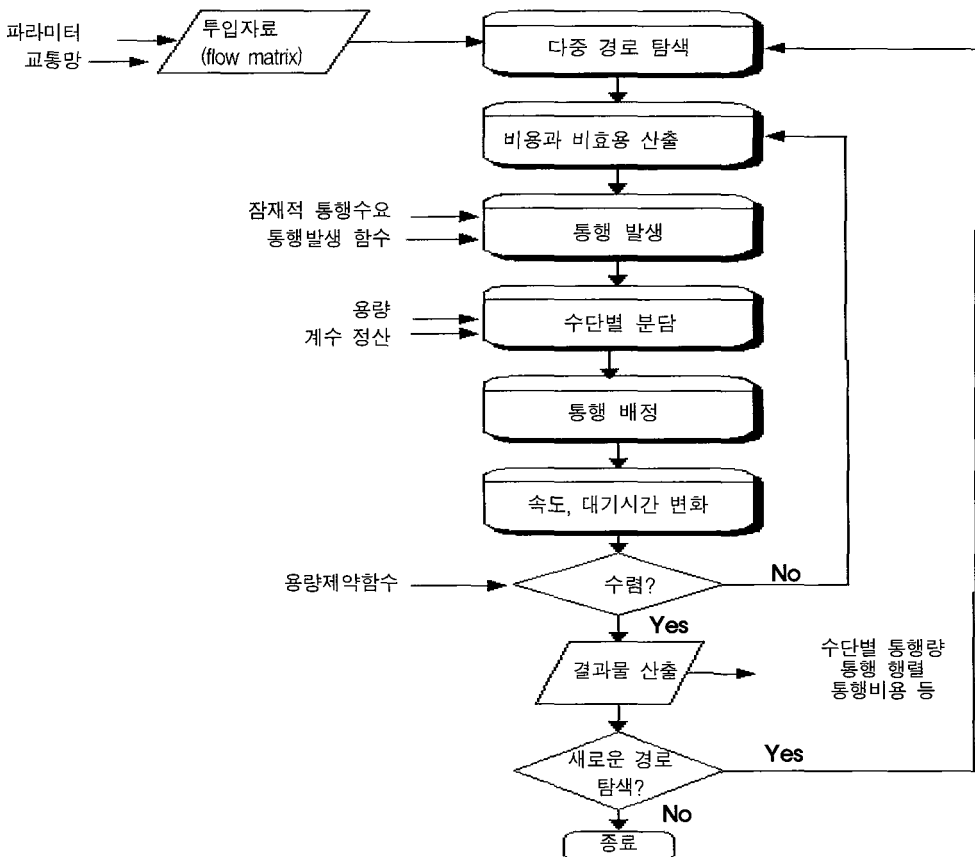
반복과정의 초기화에서만 외생적 생산이 존재하며, 외생생산으로부터 생산이 유발되고, 이러한 생산은 초기 생산에 대한 수요를 충족시키게 된다. 두 번째 반복회에서는 첫 번째 반복회 결과를 토대로 유도된 생산량이 배분된다. 이 과정은 순차적인 반복회를 거듭하게 되며, 반복횟수가 많아질수록 유도된 생산의 증가분은 줄어들게 되며, 최종 증가분이 충분히 작을 경우 수렴하게 된다. 수렴이 이루어지면, 흐름행렬, 각 부문별로 생산, 소비, 가격 등의 결과물이 산출된다.

### 3. 교통모델의 작동 구조

토지이용 모델의 작동 결과 이동가능한 부문의 흐름행렬(flow matrix)이 산출된다. 이 흐름행렬은 토지이용-교통 인터페이스 모듈을 통해 교통범주별 통행수요로 변환된다. 일례로 인터페이스 모듈에서는 연간 화폐단위로 산출된 이동되어야 할 생산량을 1일 수송되어야 할 물동량(톤)으로 변환시키거나, 고용과 주거 관계의 흐름행렬로부터 가정↔직장 간의 잠재적 통행수요를 산출한다. 이렇게 토지이용-교통 인터페이스 모듈은 경제부문간의 흐름을 교통범주별 흐름으로 변환시켜 교통모델이 작동될 수 있도록 중간 매개역할을 한다.

교통모델 작동의 궁극적인 목적은 다양한 활동부문의 흐름행렬로부터 파생되는 통행수요로부터 통행발생량을 추정하고 이를 공급수준에 맞추어 균형에 도달하도록 하면서 통행배정과 수단별 분담 및 노선을 배정하는 것이다. 이렇게 교통모델의 작동 결과 산출된 교통비용과 비효용(접근성) 정보는 다음 시점에서의 활동입지-토지이용 모델에 영향을 미치게 된다.

〈그림 6〉은 TRNUS에서 교통모델의 운용 구조를 나타낸 것으로, 교통모델의 경우 전형적인



〈그림 6〉 교통모델의 운용 구조

통행수요모형의 통행발생 → 통행배분 → 수단분담 → 노선배정의 4단계의 순차적 과정을 따르고 있으나, 가장 우선적으로 수단별 경로구축(path building)에서부터 첫 단계가 시작된다. 통행수요추정 4단계 모형에 대해서는 이미 널리 알려져 있으므로, 여기서는 각 단계에 대한 세부적 설명보다는 TRANUS 시스템에서 교통모델이 어떻게 순차적 과정을 거치면서 토지이용 모델과 통합되는가에 초점을 두고 살펴보고자 한다.

첫 번째 경로탐색 및 구축단계에서는 각 출발지와 목적지를 연결하는 일련의 경로들을 탐색하게 된다. 여기서 경로란 순차적으로 연결된 구간들과 수요자들이 주어진 통행을 위해 갈아타는 경우 이용하는 일련의 교통수단(버스, 자가용, 지하철 등)을 포함한다. 경로를 결정하기 위해 그래프로 표현된 교통망(network)에 대한 정보, 특히 각 구간별로 구간 유형, 구간 길이, 물리적 용량, 대중교통 수단별 운영 용량, 회전 금지 등에 대한 정보가 필요하다. 이러한 교통망 정보를 바탕으로 교통비용과 비효율을 추정하는 함수와 계수를 정산하여 일련의 경로들을 탐색하게 된다. TRANUS 시스템에서 경로탐색방법은 다수단-다경로 탐색 알고리즘을 도입하고 있으며, 무작위효용이론에 기초하여 추정한다.

모든 경로를 결정하고 나면 두 번째 단계에서는 반복회를 통해 각 경로별, 수단별 비용을 산출한다. 각 경로에 대한 통행거리, 시간, 경비 등을 측정하고 이들 비용요소들에다 접근시간, 대기시간, 갈아타기 시간, 지체시간 등등을 포함한 통합비용 또는 일반화비용을 산출한다. 만일 혼잡도로 인해 대기시간이나 통행에서의 변화가 나타나면 일반화비용은 다시 계산된다. 모든 경로에 대한 가중산술평균 비용은 화폐비용으로 추정되지만, 통합비용은 개개의 경로에서 각 수단별로 대수 평균값으로 총량화된다. 마찬가지로 방법으로 모든 교통수단에 대한 평균비용과 각 출발지와 목적지간 통행에 대한 통합비용이 산출된다.

세번째 단계에서는 전행적인 통행수요모형에 따라 각 존별 통행발생량을 추정하게 된다. 여기서는 토지이용-교통 인터페이스 모듈을 통해 산출된 잠재적 통행수요로부터 일정한 기간(일반적으로 1일 또는 침두시간)에 각 존별로 실제 총통행량(유출, 유입량)을 생성한다. 특정한 범주별로 기종점간 통행발생량을 추정하는데, 이때 혼잡비용에 영향을 주는 탄력계수를 이용한다. 통행수요에서의 탄력성이란 통행비용이 감소된다면 더 많은 통행을 유발할 것이라고 전제한다. 일례로 직장과 집이 가까운 사람의 경우 통행비용이 감소되면 점심을 먹기 위해 집으로 통행하는 일이 더 많아질 것이며, 만일 출퇴근 시간에 혼잡도가 심하다면 사람들은 출퇴근 시간을 피해 통행하려고 할 것이다. 뿐만 아니라 통행발생의 탄력성 개념을 도입함으로써 새로운 교통시설이 만들어지는 경우 추가로 유발되는 통행수요를 추정할 수 있다.

네번째 단계에서는 산출된 통행발생을 기준으로 하여 각 존의 유출통행량이 어느 존으로 유입될 것인가, 또는 각 존에 유입된 통행이 어느 존으로부터 유출된 것인가를 추정하고 수단별로 통행량을 분담하게 된다. 이 단계에서는 각 범주별 통행이 기종점을 연결하는 서로 다른 다중수단 경로에 배분되는데, 수단별, 구간별로 동시에 배분된다. 이 때 각 경로별로 일반화비용에

의해 결정된 효용함수를 반영하는 혼잡로짓모형을 이용하여 각각의 수단들에 통행량이 분담된다. 두 존간에 배분된 기종점 통행량을 각 교통수단에 분담시키기 위해 통행수단이 갖는 특성(통행소요시간, 경비, 주차비용, 편리성, 안정성, 정시성)과 차내시간, 접근시간, 대기시간, 갈아타기 시간 등을 고려하게 된다.

이렇게 수단별로 통행량이 분담되고 나면 각 수단별, 존간 교차통행이 어떠한 경로 또는 노선을 따라 이동할 것인가를 추정하는 통행배정 또는 노선배정 단계로 이어진다. 즉, 존 간 교차통행량을 존 간 연결가능한 경로 또는 노선에 분할, 배분하는 것이다. 여기서는 각 도로구간별, 각 교차로 방향별, 대중교통수단 각 구간별 통행수요량을 배정하게 된다.

교통모델의 마지막 단계에서는 공급용량에 제약이 있는가를 점검하게 된다. 한 노선에서 차량이 수용용량에 근접하면 속도가 줄어들거나 통행시간이 증가한다. 줄지어 버스를 기다리게 되는 경우 혼잡노선 뿐만 아니라 혼잡노선의 전후 또는 상하 방향으로 연착이 확산된다. 용량 제약은 대중교통 서비스의 승객들에게도 적용된다. 승객수가 용량 제약 수준에 근접하면 대기시간이 늘어나게 되므로 순차적인 반복회가 거듭될수록 매력도가 떨어지게 된다. 혼잡과 대기 시간은 통행비용을 변화시키고 초기에 산출된 비효율을 변화시킨다. 각 구간별, 경로별로 수요/용량 비율에 따라 속도와 대기시간이 산출된다. 속도와 대기시간은 비용과 비효율에 영향을 주기 때문에 이러한 변화가 발생하면 반복회를 통해 비용 산출, 통행 발생, 수단 분담, 통행 배정을 하고 다시 비용을 산출하는 순서로 반복과정을 거듭하면서 균형을 이룰 때 까지 지속된다. 이렇게 수요와 공급이 균형을 이루어 수렴하게 되면 각 구간별로 용량, 속도, 대기시간의 변화율을 산출한다.

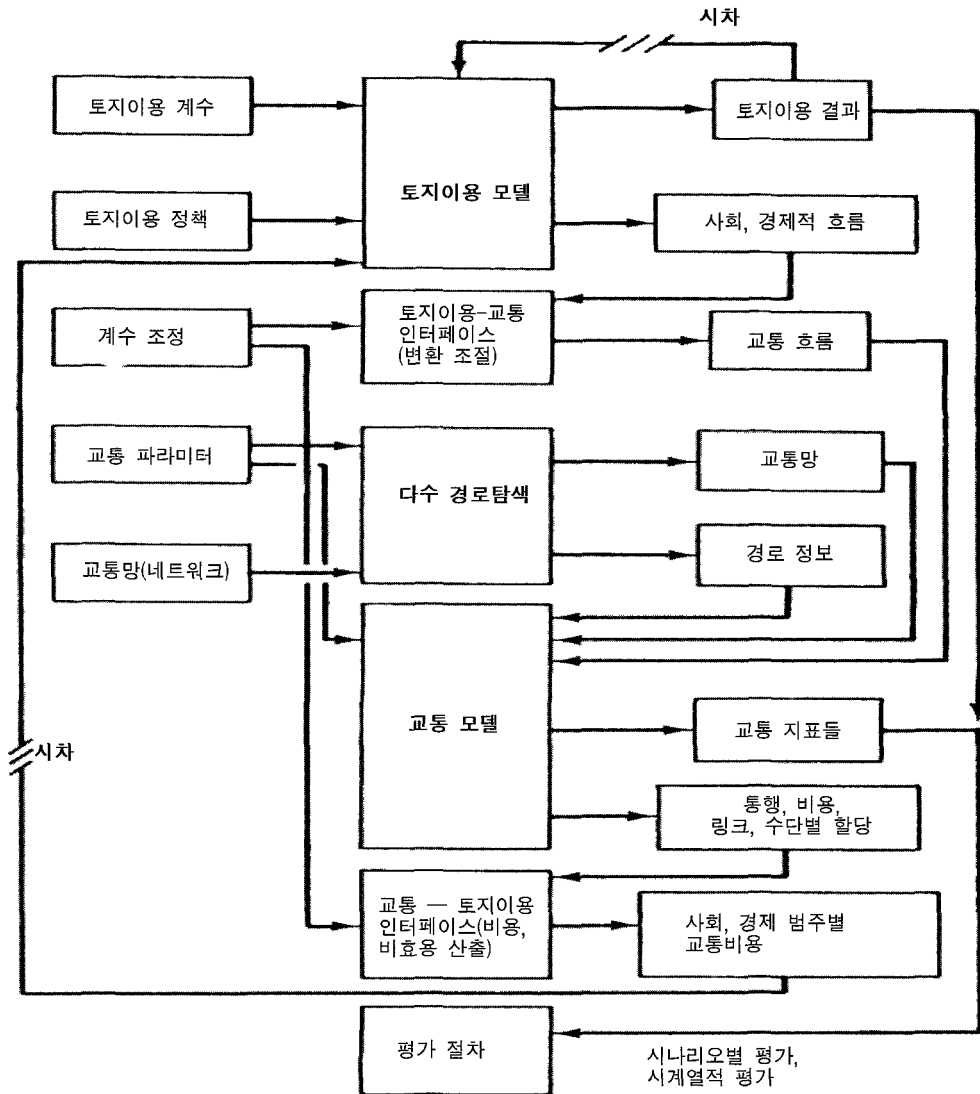
초기화 시점에서는 비용과 비효율은 자유교통류와 최소 대기시간을 기준으로 이루어지지만, 반복 과정이 수렴되어 끝난 시점에서는 속도와 대기시간, 통행량이 네트워크 각 구간에 부과되어 초기화 시점과는 상당히 달라지게 된다. TRANUS 시스템의 교통모델에서는 이렇게 부과된 비용(loaded cost)은 경로 탐색에 다시 반영되는 피드백 과정의 구조를 가지고 있다.

#### 4. 토지이용-교통모델 통합화 작동구조

앞에서 살펴본 바와 같이 토지이용과 교통의 통합모델의 운용 메카니즘은 동태적이며, 시차를 두고 서로 상호작용하고 있다. 여기서는 TRANUS 시스템을 사례로 토지이용모델과 교통모델이 어떻게 통합화되면서 실제로 작동되는가를 살펴보고자 한다. TRANUS 시스템에서 두 모델의 통합화를 위한 운용 구조를 보면 <그림 7>과 같다.

통합화 작동구조의 첫 단계는 토지이용 모델에서부터 시작된다. 토지이용 모델이 작동되기 위해서는 이전 시기의 활동입지와 현재 토지이용 정책, 이전 시기의 교통 비용과 비효율(접근성) 및 필요한 파리미터들이 투입요소로 요구된다. 토지이용 모델의 순차적 연산과정을 거쳐서 작동이 끝나고 나면 그 결과물로 현재 시점의 활동입지와 소요 연면적 및 토지가격, 입지 효용성 등





〈그림 7〉 TRANUS를 통해서 본 토지이용-교통모델 통합화 운용 구조

이 산출되며, 경제부문의 흐름 행렬(flow matrix) 파일이 생성된다.

두 번째 단계에서는 토지이용모델과 교통모델의 인터페이스 모듈이 작동한다. 이 모듈에서 흐름행렬 데이터들을 집단화, 분리, 또는 통합하여 새로운 교통범주의 데이터로 변환된다. 여기서는 토지이용 모델에서 산출된 흐름행렬과 파라미터를 토대로 교통범주에 필요한 행렬로 변환하여 새로운 파일을 생성한다. 물론 이러한 기능을 수행하기 위해 추가적인 행렬 연산과정을 필요로 한다. 예를 들면 통행목적별(직장↔주거, 주거↔쇼핑 등등), 일일 통행수요 또는 첨두시간대

별 통행 수요 등으로 변환시킨다.

이렇게 추정된 통행 수요는 다음 단계인 수단별 경로탐색 모듈로 연계되어 출발지와 목적지를 연결하는 각 경로별, 교통수단별 탐색이 진행된다. 여기서 교통모델의 파라미터와 네트워크 파일 정보를 받아들인다. 각 수단별로 출발지와 목적지간의 경로수를 탐색하고 각 경로에 관한 비용 및 비효용 정보를 산출한다.

그 다음 단계에서는 교통모델이 작동되는데, 이전 단계에서 산출된 통행수요 정보와 경로정보를 받아들여서 통행수요모형의 전형적인 4단계의 연산과정을 순차적으로 거치게 된다. 즉, 통행 발생, 통행배분, 수단 분담, 통행(노선)배정을 거치고 나서, 최종적으로 제약용량을 점검하면서 반복회를 거듭하게 된다. 교통 수요-공급의 균형을 이룰 때까지 반복적인 시뮬레이션이 계속되며, 수렴하게 되면 비용과 통행행렬에 대한 결과물을 산출한다.

이렇게 산출된 교통 관련 결과물은 다음 단계인 교통-토지이용 인터페이스 모듈로 이어지게 된다. 이 모듈은 앞에서 언급된 토지이용-교통 인터페이스 모듈과 정반대의 기능을 수행하며, 토지이용모델과 교통모델을 통합하는데 매우 중요한 역할을 한다. 여기서는 교통모델에서 산출된 교통범주별 비용행렬을 토지이용 모델에서 받아들일 수 있도록 사회, 경제적 범주로 변환시켜, 각 존별로 교통비용과 비효용을 추정한 결과물을 산출한다. 이러한 정보는 다음 시점에서 토지이용 모델을 작동하는데 투입요소로 받아들여지게 된다. 이와 같은 작동 메카니즘을 통하여 토지이용 모델과 교통모델이 통합화되고 시차를 두고 상호작용을 하게 된다.

통합화 운용구조의 마지막 단계에서는 평가가 이루어진다. 여기서는 각 시나리오별로 시뮬레이션을 통해 산출된 결과물을 비교하거나 시계열적으로 산출된 결과들을 비교하게 된다. 이러한 평가결과는 보다 에너지 효율적이고 지속가능한 도시발전을 도모하는데 효과적인 토지이용 정책 및 교통정책을 수립, 시행하는데 필요한 정보로 활용된다.

#### IV. 결론

자원절약형 저에너지 소비를 통해 보다 지속가능한 도시로 만들어 가는데 가장 큰 영향을 미치는 부문은 교통체계와 토지이용 부문이라고 볼 수 있다. 특히 에너지 소비가 급증하고 환경오염 수준이 심각해지면서 교통에너지를 근본적으로 감소시키는 토지개발 형태 및 패턴에 대한 연구가 절실히 요구되고 있으며, 더 나아가 토지이용계획과 교통계획의 통합적인 정책 및 제도 방안 마련도 시급히 요청되고 있다. 이는 토지이용과 교통체계가 긴밀한 상호의존적 연계성을 맺고 있어 토지이용의 변화에 따라 통행수요가 파생되며, 이렇게 파생된 통행수요는 교통체계에 영향을 주며, 이는 다시 토지이용패턴에 영향을 미치기 때문이다.

미국을 비롯한 유럽의 여러 나라들의 경우 토지이용모델과 교통모델을 통합화한 시스템을 활용한 동태적 모의실험을 수행하고 있고, 이를 통해 지속가능한 도시개발을 도모하고 있다. 아울

러 토지이용, 교통, 환경을 통합한 정책을 시행하려는 구체적인 제도도 마련되어 있다. 그러나 우리나라의 경우 토지이용모델과 교통모델과의 통합적 접근방법의 장점과 통합적 접근방법의 필요성에 대해서는 공감대가 형성되어 있지만, 통합적 접근방법을 실증적으로 활용한 연구나 정책 시행은 아직 이루어지고 있지 못한 형편이다. 토지이용에 관한 연구에서 교통은 외생변수로 보는 것이 일반적이었으며, 교통모델에서도 다양한 활동에 의해 파생되는 교통 수요를 외생변수로 받아들이고 있다. 이에 따라 중장기 교통수요를 예측하여 그 수요에 대응하는 공급능력체계를 수립하는데 많은 어려움을 겪어왔으며, 교통시설을 포함한 교통체계의 투자에 따라서 토지이용패턴이 어떠한 영향을 받는가에 대한 분석도 미미하게 이루어졌다. 이는 실제로 토지이용과 교통체계를 통합시켜 운용할 수 있는 소프트웨어가 부족하고 이에 필요한 데이터베이스 구축이 상당히 방대하기 때문이다. 그러나 활동의 입지가 토지이용 패턴과 부동산 시장에 어떠한 영향을 미치며, 교통체계와 어느 정도 영향을 주고 받는 가에 대한 정확한 이해가 없다면 지속가능한 도시 공간구조 형성을 위한 토지이용 계획이나 교통체계를 개선하기 위한 투자들이 성공하기 어려울 것이다.

본 연구는 토지이용-교통 통합모델의 근간을 이루고 있는 이론들이 어떻게 발달되어 왔는가를 살펴보고, 실제로 토지이용-교통 통합모델이 어떻게 운용되는가를 이해하기 위해 통합모델의 운용 메카니즘을 파악하려는데 목적을 두었다. 이를 위해 토지이용-교통 통합모델의 대표적 시스템인 TRANUS를 사례로 하여 고찰하였다. 토지이용 모델과 교통모델이 핵심을 이루고 있는 TRANUS 시스템에서 두 모델은 토지이용-교통 인터페이스 모듈과 교통-토지이용 인터페이스 모듈을 통해 동태적으로 시차를 두고 연계되면서 서로 영향을 주고 받는다. 토지이용과 교통체계가 탄탄하게 통합되어 있는 TRANUS 시스템의 운용원리를 보면, 시스템의 구성요소 가운데 하나가 변화될 경우 다른 요소들이 어떠한 변화를 일으키는가를 분석하는데 동태적 시뮬레이션을 통해 균형에 도달할 때 까지 반복회를 거듭하면서 최종 결과물을 산출한다. 토지이용모델과 교통모델이 통합되어있는 작동구조와 정산화된 모델에 기반한 연산과정을 통해 토지이용-교통체계 간 상호작용 결과물 산출이 가능하다. 따라서 에너지 효율적인 도시공간구조를 구축하고 지속가능한 도시개발을 도모하는 정책들을 평가하는데 TRANUS는 상당히 활용성이 높다고 볼 수 있다. 특히 토지이용 규제나 신도시 개발 계획들이 활동입지와 토지이용 패턴, 그리고 교통체계에 어떻게 영향을 미치는지, 또는 교통개선이나 통행비용의 변화가 도시에서 일어나고 있는 각종 활동의 입지와 분포를 어떻게 변화시킬 것인지에 대해 다양한 시나리오를 구축하고 이를 시뮬레이션한 후, 그 결과를 비교하여 최선의 대안을 선택하는데 토지이용-교통 통합모델의 유용성은 매우 크다고 볼 수 있다.

아직 우리나라에서는 토지이용-교통 통합모델의 기초가 되는 이론들과 모델들에 기반하며, 실제 연산가능하도록 알고리즘을 개발하고 이를 계획지원시스템으로 구축, 활용하지 못하고 있지만, 선진국의 여러나라에서는 계획지원시스템이 활발하게 활용되고 있다. 앞으로 우리나라에

서도 다양한 데이터와 정보들을 투입하고 이를 통해 부가가치가 높고 도시 및 교통계획분야에서 매우 필요로 하는 지식을 창출할 잠재성이 높은 계획지원시스템이 적극적으로 활용되도록 노력을 기울여야 할 것이다.

### 참고문헌

- Alonso, W., 1964, *Location and Land Use*, Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Anas, A., 1982, *Residential Location Markets and Urban Transportation: Economic Theory, Econometrics and Policy Analysis with Discrete Choice Models*, New York: Academic Press.
- Anas, A., 1987, *Modeling in Urban and Regional Economics*, Chur.: Harwood Academic Publishers.
- Badoe, D. and Miller, E., 2000, "Transportation-Land Use Interaction: Empirical Findings in North America, and Their Implications for Modeling", *Transportation Research D*, 5, 235-263.
- Boarnet, M. and Crane, R., 2001, "The Influence of Land Use on Travel Behavior: Specification and Estimation Strategies", *Transportation Research A*, 35(9), 823-845.
- Brail, R. and Klosterman, R.(eds.), 2001, *Planning Support Systems: Integrating Geographic Information Systems, Models, and Visualization Tools*, Redlands, ESRI Prsss.
- Cervero, R., 1996, "Mixed Land Uses and Commuting: Evidence from the American Housing Survey", *Transportation research A*, 30, 361-377.
- Christaller, W., 1933, *Die Zentralen Orte in Suddeutschland*, Jena, English translation by Baskin, C., 1966 *Central Places in Southern Germany*, Prentice Hall.
- Crane, R.I, 2000, The Influence of Urban Form on Travel: An Interpretative Review, *Journal of Planning Literature*, 15: 3-23.
- de la Barra, T., 1989, *Integrated Land Use and Transport Modelling: Decision Chains and Hierarchies*, Cambridge: Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_. 2001. Integrated Land Use and Transport Modelling: The TRANUS experience, in Brail, R. and Klosterman, R, (eds.), *Planning Support Systems: Integrating Geographic Information Systems, Models, and Visualization Tools*, Redlands, ESRI Prsss, 129-156.
- Domencich, T. and McFadden, D., 1975, *Urban Travel Demand: A Behavioural Analysis*, Amsterdam: North-Holland.
- Fotheringham, A. S. and O'Kelley, M.E., 1989, *Spatial Interaction Models: Formulations and Applications*, Dordrecht, Kluwer.
- Handy, S., 2005, "Smart Growth and the Transportation-Land Use Connection: What does the Research Tell Us?", *International Regional Science Review*. 28(2), 146-167.

- Hansen, W. G., 1959, "How Accessibility Shapes Land Use," *Journal of the American Institute of Planners*, 25, 69-82.
- Harris, B., 1985, "Urban Simulation Models in Regional Science," *Journal of Regional Science*, 25(4), 545-567.
- Huff, D. L., 1963, "A Probabilistic Analysis of Shopping Center Trade Areas", *Land Economics*, 39, 81-90.
- Lowry, I. S., 1964, *A Model of Metropolis*, Santa Monica, CA: Rand Corporation.
- McFadden, D., 1973, Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior, Working Paper No. 199/BART 10, Berkeley.
- Mills, E. S., 1969, *Studies in the Structure of the Urban Economy*, Baltimore: Johns Hopkins Press.
- Miller, E. J., Kriger, D. S. and Hunt, J. D., 1998, Integrated Urban Models for Simulation of Transit and Land-Use Policies, Transit Cooperative Research Project, National Academy of Sciences.
- Putnam, S. H., 1973, *The Interrelationships of Transport Development and Land Development*, University of Pennsylvania, Philadelphia: Department of City and Regional Planning.
- \_\_\_\_\_, 1983, *Integrated Land Models, Policy Analysis of Transportation and Land Use*, London: Pion Limited.
- Southworth, F., 1995, A Technical Review of Urban Land Use-Transportation Models as Tools for Evaluating Vehicle Reduction Strategies. Oak Ridge, TN, Oak Ridge National Laboratory.
- Von Thünen, J. H., 1826, *Der Isolierte Staat in Beziehung auf landwirtschaft und Nationalökonomie*, Hamburg. English translation by C. M. Wartenberg, 1966 in Hall, P. ed. Von Thünen's Isolated State, London: Pergamon Press.
- Williams, H.C.W.L, 1977, "On the formulation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit", *Environment and Planning A*, 9, 285-344.
- Wilson, A. G., 1970, *Entropy in Urban and Regional Modelling*, London: Pion.
- \_\_\_\_\_, 1974, *Urban and Regional Models in Geography and Planning*, New York: John Wiley.
- Wingo, L., 1961, *Transportation and Urban Land*, Baltimore: Johns Hopkins Press.
- Zegras, C., 2004, "The Influence of Land Use on Travel Behavior: Empirical Evidence from Santiago de Chile", *Transportation Research Record 1898: Travel Demand and Land Use*.